

# 풍력터빈 적용을 위한 PMSG용 영구자석의 와전류손실에 관한 연구

## A Study on the Eddy Current Loss of the Permanent Magnet for PMSG for the Wind Turbine Application

최만수\*, 문채주\*\*\*, 쏜루이\*\*\*, 장영학\*\*\*\*, 박태식\*\*\*\*\*, 정문선\*\*\*\*\*, 광승훈\*\*\*\*\*  
Man-Soo Choi\*, Chae-Joo Moon\*\*\*, Rui-Sun\*\*\*, Young-Hak Chang\*\*\*\*,  
Tae-Sik Park\*\*\*\*\*, Moon-Seon Jeong\*\*\*\*\*, and Seung-Hun Kwak\*\*\*\*\*

(Submit date : 2013. 11. 27., Judgment date : 2013. 12. 10., Publication decide date : 2014. 2. 18.)

**Abstract :** The objective of this paper is to suggest a design topology of permanent magnet synchronous generator with 2,000kW capacities for wind turbine. The suggested topology is to provide 3 split magnet PMSG instead of single magnet, and performed an analysis of eddy current loss and iron loss for suggested type using ansoft maxwell commercial program. The simulation results of suggested magnet type show the reduction of eddy current loss as 13.87kW with loadless conditions and 23.48kW with rated conditions, but iron loss for rotor yoke show the increasing trend as 2.2kW with loadless conditions and 0.2kW with rated conditions. The suggested 3 split magnet type is to identified as more useful for 2,000kW PMSG.

**Key Words :** Ansoft Maxwell Program, 와전류손(Eddy current loss), 철손(Iron loss), 영구자석형 동기발전기(PMSG)

\*\* 문채주(교신저자) : 목포대학교 스마트그리드연구소  
E-mail : cjmoon@mokpo.ac.kr, Tel : 061-450-6424  
\*최만수 : 국립공주대학교 반도체기계공학과  
\*\*\*쏜루이 : 목포대학교 전기공학과  
\*\*\*\* 장영학 : 목포대학교 스마트그리드연구소  
\*\*\*\*\*박태식 : 목포대학교 스마트그리드연구소  
\*\*\*\*\*정문선 : 목포대학교 스마트그리드연구소  
\*\*\*\*\*광승훈 : (주)DMS

\*\*\* Chae-Joo Moon (corresponding author) : Smartgrid  
Research Institute of Mokpo National University  
E-mail : cjmoon@mokpo.ac.kr, Tel : 061-450-6424  
\*Man-Soo Choi : Dept. of Mechanical Engineering for  
Semiconductor of Kongju National University  
\*\*\*Sun Rui : Dept. of Electrical Engineering College of  
Mokpo National University  
\*\*\*\*Young-Hak Chang : Smartgrid Research Institute of  
Mokpo National University  
\*\*\*\*Tae-Sik Park : Smartgrid Research Institute of Mokpo  
National University  
\*\*\*\*\*Moon-Seon Jeong : Smartgrid Research Institute of  
Mokpo National University  
\*\*\*\*\*Seung-Hun Kwak : DMS Co., LTD

## 1. 서 론

과거 20년 이상 풍력발전기들은 유도발전기에서 요구하는 회전속도를 맞추기 위해 기어박스를 사용하여 왔다. 그러나, 기어박스의 고장은 유지보수 비용의 가장 큰 부분을 차지하는 원인이 되어왔고, 또한 최근 10년간 풍력발전기의 사이즈 및 디자인의 혁신적인 변화에 가장 부응하지 못한 부품으로 풍력발전기시스템 발전에 항상 걸림돌이 되어왔다. 최근에 풍력발전기 산업계에는 보다 간단한 Drive Train의 요구가 점점 커지게 되었으며, 이에 직결 방식의 풍력발전기가 현재 활발히 연구되고 있다. 직결방식에서도 독일의 Enercon사와 같은 권선형 동기발전기는 그 무게와 크기가 종래의 풍력발전기보다 크기 때문에 실질적인 적용에 많은 부담이 되고 있다. 이에 대한 대안으로 Delft 공대, Harkosan, Vensys사 등을 중심으로 영구자석형 동기발전기 개발이 더욱 활발히 이루어져 왔으며 최근 그 기술들이 완성 단계의 제품들을 출시하고 있다. [1][2]

최근 영구자석 발전기 설계에서 회전자 부분에서 발생하는 손실에 관한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 회전자 부분에서 발생하는 손실은 주로 회전자의 도전체에서 발생하는 와전류 손실을 의미한다.[3] 와전류 손실은 회전자의 도전체, 즉 영구자석이나 영구자석의 비산을 방지하기 위해 삽입된 리테이너에서 발생하는 손실을 의미한다. 이러한 와전류 손실은 영구자석의 감자 현상에 영향을 미치게 되어 발전기의 안정적인 운전을 방해하는 요소가 되고 있다.[4][5]

자속이 도전체를 통과할 때 그 도체에는 와전류가 생성되며, 그 도전체의 면적이 클수록 큰 전압 불균형이 생기므로 이에 따른 큰 와

전류가 생성된다. 그러므로 자속이 통과하는 도전체는 자속 통과면적을 작게 할 필요가 있다. 영구자석 또한 동일한 영향으로 와전류가 생성되며 이 손실을 줄여야 발전기 효율을 높일 수 있다. 그러나, 현실적으로 영구자석을 무한하게 분할할 수 없으며, 설계되는 발전기의 제작가능성과 제작비용 등을 고려하여 분할 수량을 결정하여야 한다.

따라서, 본 논문에서는 영구자석을 최대 3개로 분할한 동기발전기를 설계하여 와전류손실을 줄이고자 한다. 한편 영구자석의 와전류 손실계산에서 영구자석의 길이와 넓이의 비례관계에서 2차원 해석결과는 보정을 통하여 3차원 해석과 유사한 결과를 확인할 수 있다.[6] 따라서, Ansoft maxwell 2D 프로그램[7][8]을 이용해 영구자석의 분할에 따른 와전류 손실을 2차원 유한요소 해석을 통하여 확인하고 또한 로터요크의 철손도 확인하고자 한다.

## 2. 동기발전기 설계 및 시뮬레이션

### 2.1 해석 모델

표1은 2,000kW 표면부착형 영구자석 동기발전기의 설계요구사항을 보여주고 있다. 설계출력과 회전속도는 각각 2,080kW, 17rpm이며 부하 선전압은 392Vrms이다.

Table. 1 Design of PMSG

Item	Design Requirement
Rated speed	17rpm
Number of Poles	98
Load voltage	392Vrms
Load current	2,300Arms
Load output power	2,000kW
Efficiency requirements	96%

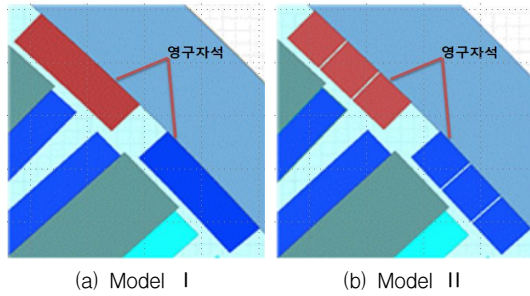


Fig. 1 Design models of PMSG

설계사양에 따라 그림 1과 같이 영구자석을 2가지 모델로 설계 하였으며, 각 설계 모델의 사양은 표 2와 같다. Model I 은 설계사양에 따른 기본적인 설계모델이며, Model II는 영구자석을 3개로 분할한 형태이고 영구자석 동기 발전기의 해석 모델의 설계사양은 표 2와 같다.

Table. 2 Specifications for design models

Item	Model I	Model II	
Rotor diameter	4,330mm		
Permanent magnet Bore	4,110mm		
Permanent magnet height	30mm		
Circumferential length of the permanent magnet	102mm	Magnet	33mm
		Air	1.5mm
Stator outer	4,105mm		
Air gap	5mm		
winding method	Concentrated Winding		
Number of Turns	6		
Material	NdFeB		

본 논문에서 선정된 영구자석의 경우 타 자석 보다 높은 에너지 밀도를 갖고 에너지 변환기에 적용 시 높은 출력밀도를 낼 수 있는 NdFeB를 선정하였으며, NdFeB계의 영구자석 특징은 표 3과 같다.

Table. 3 Material properties of PM

Material Properties	Value
flux density of the permanent magnet [T]	1.25
Permeability of the permanent magnet	1.05

### 2.2 와전류 해석이론

일반적으로, 자계 분포 예측을 위한 해석은 자계  $\vec{H}$ , 자속밀도  $\vec{B}$ , 그리고 전류밀도  $\vec{J}$ 를 갖는 Maxwell 방정식으로부터 얻어진다. 자기 벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 는 식 (1), (2)로 정의된다.[9]

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \quad (2)$$

패러데이 법칙과 자기 벡터 포텐셜의 정의로부터 식(3)으로 표현되는 전계특성식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial(\nabla \times \vec{A})}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (4)$$

도체에 유도되는 와전류  $\vec{J}$ 는  $\vec{J}_e = \sigma \vec{E}$ 로 표현 가능하므로 식(3)은 식(5)로 다시 쓸 수 있다.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (5)$$

### 2.3 시뮬레이션

본 논문에서 Ansoft Maxwell 2D 프로그램을 활용하여 유한요소 해석 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 조건은 무부하 운전일 때와 정격 운전일 때 자석의 형태에 따라 발생하는 와전류 손실을 분석하였다. 이때 정격속도는 17rpm, 정

격 주파수 13.88Hz, 정격 전류 2,300Arms 이다.  
그림 2는 Model I 의 설계도면을 나타낸다.

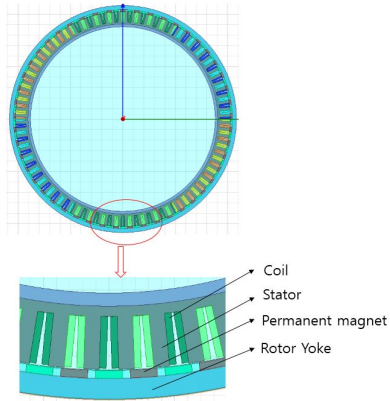
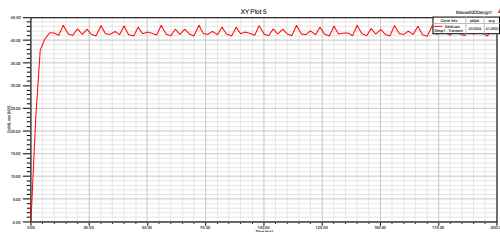
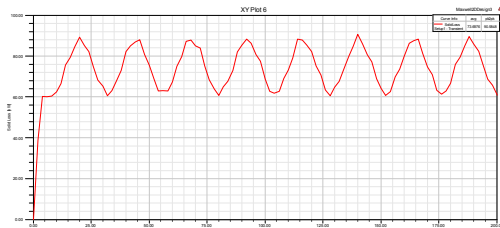


Fig. 2 Model I design drawings



(a) Eddy current loss for no load operation



(b) Eddy current loss for normal operation

Fig. 3 The analysis results of eddy current loss for Model I

그림 3에서 Model I 의 무부하 조건에서 영구자석에 생기는 와전류 손실은 41.29 kW이며, 정격운전에서는 73.69kW 와전류 손실이 나타난다. 그림 4는 Model II 의 설계도면을 나타낸다.

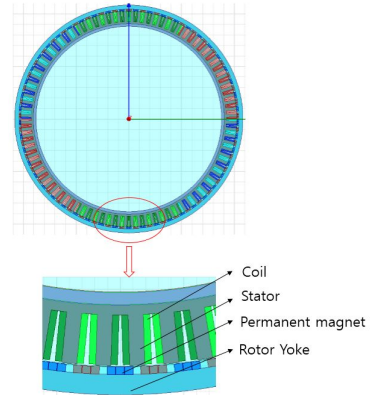
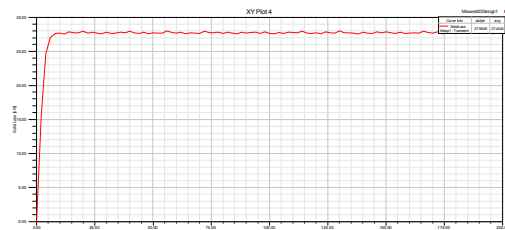
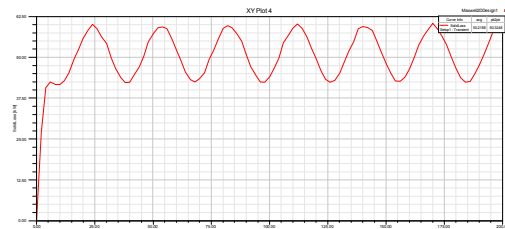


Fig. 4 Model II design drawings

그림 5는 Model II의 무부하 조건에서 영구자석에 생기는 와전류 손실이 27.42kW이며, 정격운전에서 50.21kW의 와전류 손실이 나타난다.



(a) Eddy current loss for no load operation



(b) Eddy current loss for normal operation

Fig. 5 The analysis results of eddy current loss for Model II

그림 6은 정격운전에서 Model I 의 자속밀도 분포도를 나타낸 것이고 그림 7은 정격운전에서 Model II 의 자속밀도 분포도를 나타낸 것이다.

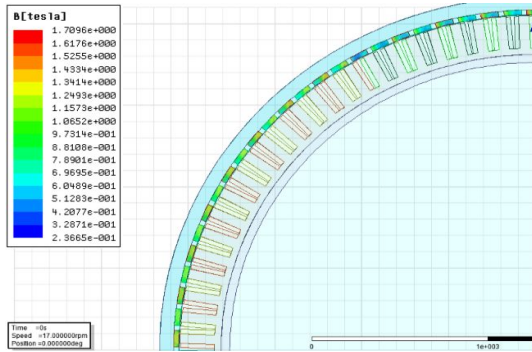


Fig. 6 Magnet flux density distribution of Model I when no load operation

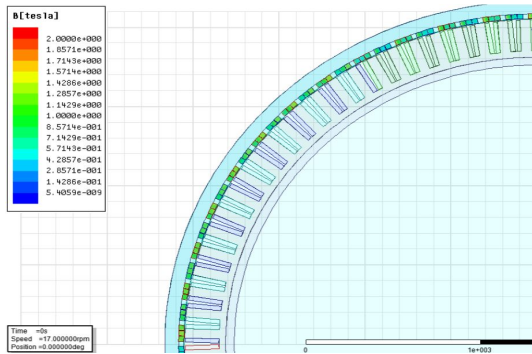


Fig. 7 Magnet flux density distribution of Mode II when load operation

## 2.4 결과 분석

무부하 조건에서 Model I 은 와전류손실이 41.29kW이고 Model II는 27.42kW이다. 정격 운전조건에서 Model I 은 73.69kW이고 Model II는 50.21kW로 분석되었다. 결과적으로 3개로 영구자석을 분할한 Model II가 무부하 조건이나 정격운전 조건에서 Model I에 비교하여 와전류손실이 줄어든 것을 알 수 있다.

## 3. 발전기 Rotor yoke의 철손

### 3.1 철손 해석이론

철손  $P_v$ 는 시간적으로 변하는 자계에 의해

철심내부에서의 자구가 변화할 때 발생하는 에너지 손실에 의한 히스테리시스 손실  $P_h$ , 와전류 손실  $P_c$ , 이상 와전류 손실분  $P_e$ 로 구분된다.

$$P_v = P_h + P_c + P_e \quad (6)$$

$$= K_h f (B_m)^n + K_c f^2 (B_m)^2 + K_e f^{1.5} (B_m)^{1.5}$$

여기서 각 항은 다음과 같다.

- $P_h$  : 히스테리시스 손실
- $P_c$  : 와전류 손실
- $P_e$  : 이상와전류 손실
- $K_h$  : 히스테리시스 손실상수
- $K_c$  : 와전류 손실상수
- $K_e$  : 이상와전류 손실상수

구상흑연주철로 설계된 로터 요크의 시편을 제작하여 자기적 특성을 측정된 결과 BH 곡선은 그림 8과 같고 주파수에 따른 철손은 그림 9와 같이 나타난다.

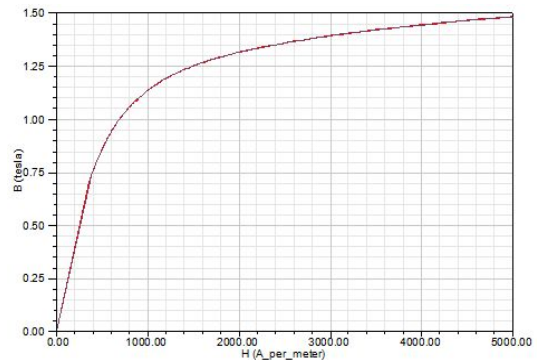


Fig. 8 B-H curve for Rotor Yoke

그림 8에서 로터 요크는 자계(H)에 따라 자속밀도(B)가 1.2[T]에서 급격히 포화되기 시작하므로 1.2[T] 이하가 되도록 설계가 필요하며, 그림 9는 사용 주파수에 따른 구상흑연주철의 손실값을 측정된 것으로 주파수가 증가하면 손실이 증가한다.

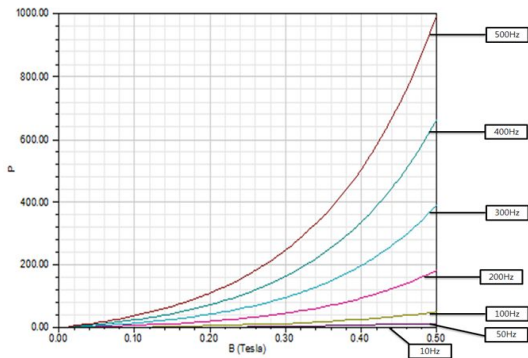
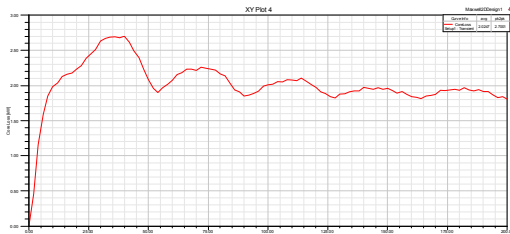


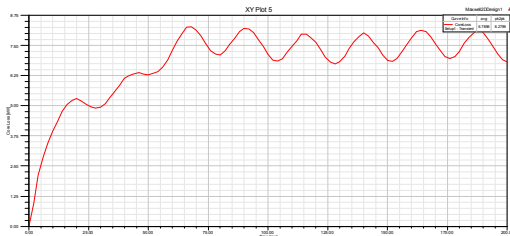
Fig. 9 Iron loss characteristics according to frequency for Rotor Yoke

### 3.2 시뮬레이션

Ansoft Maxwell 2D 프로그램을 활용하여 유한요소 해석 시뮬레이션을 수행하였으며, 해석 조건은 무부하 운전일 때와 정격 운전 일 때 Model I 과 Model II에 대한 철손을 분석하였다. 이때 정격속도는 17rpm, 정격 주파수 13.88Hz, 정격 전류 2,300Arms 이다. Model I에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 10와 같다.



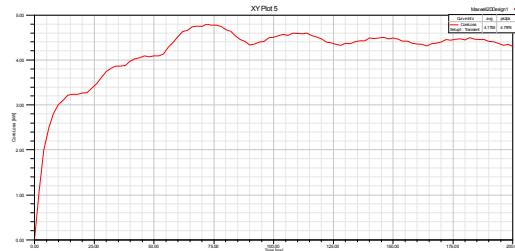
(a) Iron loss for no load operation



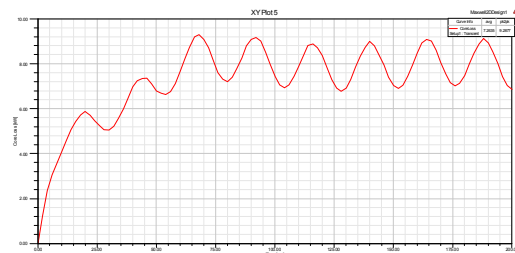
(b) Iron loss for load operation

Fig. 10 The analysis results of iron loss for Model I

Model I 은 무부하 조건에서 Rotor yoke에 생기는 철손은 2kW이며, 정격운전에서는 6.8kW 철손이 나타난다. Model II에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 11과 같다.



(a) Iron loss for no load operation



(b) Iron loss for normal operation

Fig. 11 The analysis results of iron loss for Model II

Model II는 무부하 조건에서 Rotor yoke에 생기는 철손은 4.2kW이며, 정격운전에서는 7.3kW 철손이 나타난다. 그림 12는 정격운전에서 Model I의 철손 분포도를 나타낸 것이고 그림 12는 정격운전에서 Model II의 철손 분포도를 나타낸 것이다.

### 3.3 결과 분석

Model I 은 무부하 조건에서 Rotor yoke에 생기는 철손은 2kW이며, 정격운전에서는 6.8kW 철손이 나타난다. Model II는 무부하 조건에서 Rotor yoke에 생기는 철손은 4.2kW이며, 정격운전에서는 7.3kW 철손이 나타난다.

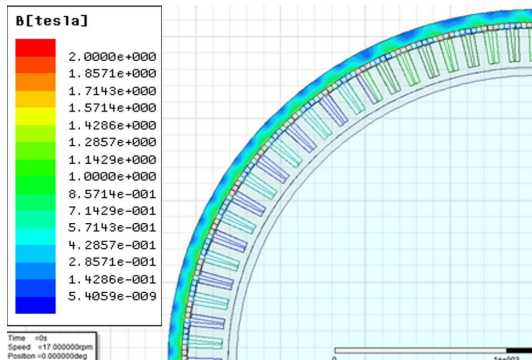


Fig. 12 Iron loss distribution of Model I when no load operation

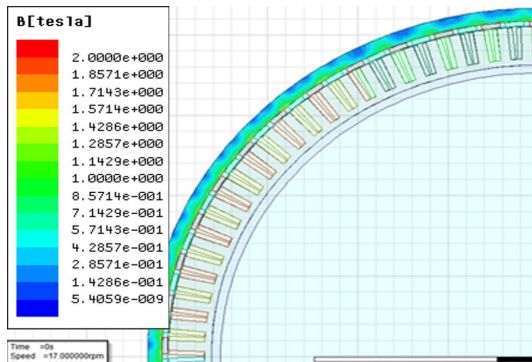


Fig. 13 Iron loss distribution of Model I when no load operation

#### 4. 결 론

본 논문에서는 영구자석의 와전류 손실 계산에서 영구자석의 길이와 넓이의 비례관계에 따른 2차원 해석결과를 확인하였다. 2차원 유한 요소법을 이용하여 3분할 효과를 고려하는 해석 결과는 Model II가 무부하 조건에서 13.87kW와 정격조건에서 23.48kW의 와전류 손실이 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 로터 요크의 철손은 Model II가 무부하 조건에서 2.2kW, 정격조건에서 0.5kW가 증가하는 것을 확인하였다. 결과적으로 제안된 영구자석 3분할 형식인 경우 와전류손은 줄어든

나 로터 요크의 철손은 증가하여 전체적으로 손실을 줄어드는 것을 확인하였다. 향후 시험 발전기를 제작하고 손실을 측정하는 비교검토가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 목포대학교 스마트그리드연구소 지원으로 수행된 연구결과입니다.

#### Reference

1. Y. Chen, P. Pillay, A. Khan, "PM Wind Generator Topologies", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 6, Nov. 2005
2. J. Lynch, "Permanent Magnet Generators : Design & Testing for Reliability", Northern Power Systems, June 2009
3. H. Polinder and M. J. Hoeijmakers, "Eddy-Current Losses in the Segmented Surface-Mounted Magnets of a PM Machine", IEEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 146, pp. 261-266, May 1999
4. Sang Yub Lee, Hyun Kyo Jung, "Eddy Current Loss Analysis in the Rotor of Surface-Mounted Permanent Magnet Brushless Machine", Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 20 No.4, pp. 138-140, Apr 2012
5. Yasuaki Aoyama, Koji Miyata, Ken Ohashi, "Simulation and Experiments on Eddy Current in Nd-Fe-B magnet", IEEE Transaction on Magnetic, VOL.41, NO. 10, pp. 3790-3792, Oct. 2005
6. Jeong-Jong Lee, Jea-Woo Jung, Sang-Ho Lee, Soon-O Kwon, and Jung-Pyo Hong, "Eddy Current Loss Analysis of Permanent Magnet using Finite Element Method", Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 2008 No.7, Aug 2008

7. Ansys, “Ansoft 12 manual”, 2011
8. Ansys, “Maxwell Circuit Editor onlinehelp”, 2013
9. Hyung-Il Park, Seok-Myeong Jang, Ji-Hwan Choi, Cheol Han and Jang-Young Choi, “Analysis of Eddy Current Loss in Permanent Magnets of Permanent Magnet Synchronous Motor based on Analytical Method”, The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.2013 No.4, 2013